



УДК 621.3

**ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ
ЛАБОРАТОРНОГО ВРАЩАТЕЛЯ ЖИДКОГО
АЛЮМИНИЯ****VERIFICATION OF NUMERICAL SIMULATION OF
LABORATORY STIRRER FOR LIQUID
ALUMINIUM**

Болотин Кирилл Евгеньевич, аспирант каф. «ЭЭТС», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5. E-mail: ke.bolotin@urfu.ru, Тел.: +7(982)660-55-08

Фризен Василий Эдуардович, Д.Т.Н., зав. каф. «ЭЭТС», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5. E-mail: vfrizen@yandex.ru

Бычков Сергей Алексеевич, К.Т.Н., доцент кафедры «ЭЭТС», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5. E-mail: s.a.bychkov@urfu.ru.

Тарасов Федор Евгеньевич, К.Т.Н., доцент кафедры «ЭЭТС», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5. E-mail: ter38@mail.ru.

Смолянов Иван Александрович, магистр «ЭЭТС», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5. E-mail: i.a.smolianov@urfu.ru.

Kirill E. Bolotin, Ph.D. student, Department «EETS», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Kovalevskaya str., 5, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ke.bolotin@urfu.ru. Ph.: +7(982)660-55-08

Vasily E. Frizen, Doctor Sc., Department «EETS», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Sofia Kovalevskaya str., 5, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vfrizen@yandex.ru

Sergey A. Bychkov, Candidate of Sc., Department «EETS», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Sofia Kovalevskaya str., 5, Ekaterinburg, Russia. E-mail: s.a.bychkov@urfu.ru.

Fedor E. Tarasov, Candidate of Sc., Department «EETS», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Sofia Kovalevskaya str., 5, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ter38@mail.ru.

Ivan A. Smolianov, master student Department «EETS», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Sofia Kovalevskaya str., 5, Ekaterinburg, Russia. E-mail: i.a.smolianov@urfu.ru.

Аннотация: Статья посвящена экспериментальной верификации компьютерной модели лабораторного подового вращателя жидкого алюминия. Верификация проводилась на основе сравнения изменения поля температур в объеме расплавленного металла. Сравнение экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования показало, что компьютерная модель может быть использована для дальнейших исследований.

Abstract: The article is devoted to the experimental verification of the computer model of the laboratory bottom stirrer of liquid aluminum. Verification was carried out on the basis of a comparison of the change in the temperature field in the volume of the molten metal. Comparison of the experimental data and the results of computer modeling showed that the computer model can be used for further research.

Ключевые слова: МГД-перемешивание; верификация; моделирование; метод конечных элементов; эксперимент.

Key words: MH-stirring; verification; modeling; finite element method; experiment.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное перемешивание занимает важное место в металлургии из-за возможности бесконтактного воздействия на металл, простоты управления и почти полной безынерционности. Применение перемешивания позволяет выравнивать температурный и химический состав расплава и ускорять протекание металлургических процессов, совмещая это с уменьшением затрат энергии, времени и материалов [1,2].

Ранее, на кафедре была разработана и создана лабораторная установка для подового перемешивания жидкого металла, использующая вращающее магнитное поле [3]. В ходе разработки были проведены расчеты оптимальных параметров установки, на основании которых была спроектирована и создана физическая модель перемешивателя, на которой была проведена верификация результатов, полученных при расчетах.

Разработанная ранее модель описывала только установившееся состояние, не рассматривая временную зависимость процессов, протекающих при перемешивании. Данная работа посвящена верификации новой динамической компьютерной модели, описывающей распределение температурного поля, в объеме расплавленного металла, в зависимости от времени.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Компьютерная модель состоит из трехмерной модели, общий вид которой показан на рис. 1. Основные параметры приведены в таблице 1.

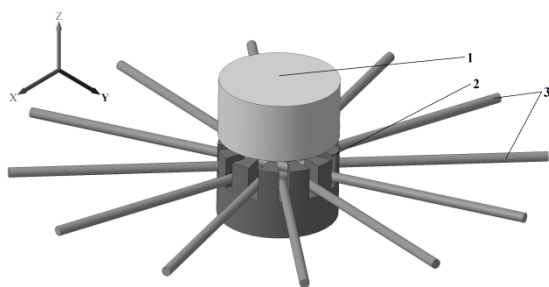


Рис. 1. Схематичное изображение перемешивателя: 1 - расплавленный металл, 2 - магнитопровод, 3 - катушки.

Таблица 1.

Параметры модели			
	Магнит- опровод	Катушки	Металл
μ	$1,2 \cdot 10^3$	1	1
σ , см/м	10^6	$5,7 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^6$
Ток, А	0	350	0
Динамическая вязкость, Па*сек	0	0	0,002

Второй составляющей является связанная задача из трех частей:

А. Электромагнитная часть

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ B = \nabla \times A \\ E = -j\omega A \\ J = \sigma E + j\omega D \end{cases} \quad (1)$$

где Δ это Набла-Оператор; H - магнитное поле; B это магнитная индукция; A магнитный векторный потенциал; J плотность тока; E электродвижущая сила и σ это электрическая проводимость.

Таким образом, система уравнений описывает взаимодействие электрического и магнитного полей, возникающих в модели.

Моделирование катушки описывается дополнительным блоком который называется «многовитковая катушка». Этот блок математически описывается уравнением (2). Усилие возникающее в металле под воздействием электромагнитного поля определяется с помощью уравнения силы Лоренца (3). Сила Лоренца дает очень хорошую точность для расчета электромагнитных сил в проводящем расплаве.

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{A} e_{coil} \quad (2)$$

где J_e – плотность тока, N – количество витков в катушке; I_{coil} – ток в катушке; A – полное сечение провода катушки;

$$F_L = J \times B \quad (3)$$

где F_L – сила Лоренца; J – ток индуцированный в расплаве; B – индукция магнитного поля в расплаве.

Б. Гидродинамическая часть

Число Рейнольдса для этой модели приблизительно равно 10^3 , что указывает на турбулентный характер движения, поэтому гидродинамическая задача была решена с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST, которая описывается уравнениями Навье-Стокса для несжимаемой жидкости:

$$\begin{cases} \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla[-pI + \eta(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \\ \nabla \cdot u = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где ρ – плотность среды; η – динамическая вязкость и F – сила, действующая на жидкость.

В. Тепловая часть

В модели учтены следующие условия:

- все физические свойства, такие как плотность и вязкость, не зависят от температуры.

- тепловая конвекция, вызванная разностью температур, игнорируется

Уравнение теплопроводности для моделирования теплообмена в жидкостях:

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T + \nabla q &= Q \\ q &= -\kappa \nabla T \end{aligned} \quad (5)$$

Где ρ - плотность среды, C_p - теплоемкость жидкости при постоянном давлении, k - теплопроводность жидкости, u - поле скорости потока, Q - источник тепла.

Высота металла $H = 90$ мм, вдоль нее был задан градиент температуры, приведенный на рисунке 2. В горизонтальной плоскости температура одинаковая.

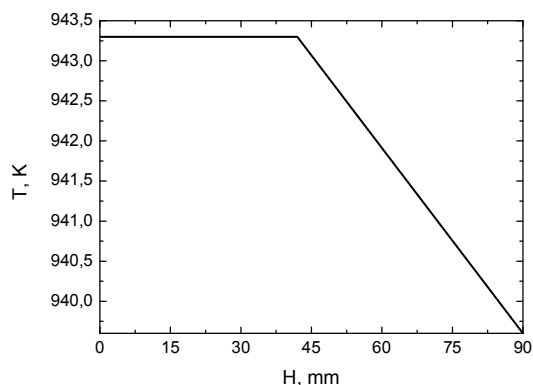


Рис. 2. Распределение температуры по высоте металла.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ЭКСПЕРИМЕНТА

На рисунке 3 приведена фотография подового лабораторного перемешивателя расплавленного алюминия использующего вращательное магнитное поле. Где 1 - магнитопровод, 2 - водоохлаждаемая обмотка, 3 - трубчатый электронагреватель (ТЭН), используемый для поддержания температуры расплавленного металла и прогрева емкости, 4 - теплоизоляция.



Рис. 3. Лабораторный перемешиватель.

На рисунке 4 показана емкость для жидкого металла, представляющая собой стакан из нержавеющей стали диаметром 10 мм и высотой 300 мм.

Так как, в настоящее время не существует оптически прозрачной жидкости, обладающей электропроводностью в 10^6 - 10^7 См/м, не представляется возможным изучать процессы протекающие в объеме при электромагнитном

вращении посредством оптических методов измерения скорости. Поэтому, для экспериментальной верификации был выбран метод, описанный в работе [4].

В стенке было проделано 3 отверстия на расстоянии 42, 57 и 72 миллиметра от дна. Затем, в них были помещены термопары с углублением в металл на 5 мм. Измерения проводились с использованием АЦП преобразователя изготовленного фирмой National instruments, частота измерения 10 Гц.



Рис. 4. Емкость для жидкого металла.

Расплавленный металл переливался в разогретую емкость, затем, его температура поддерживалась с помощью ТЭНа, расположенного ниже первой термопары, таким образом, создавался градиент температур, после этого включалось электромагнитное перемешивание для выравнивания температуры по объему расплавленного металла, фиксируемого измерительной техникой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рисунке 5 приведены результаты измерений для двух термопар находящихся на расстоянии 42 и 72 мм от дна емкости для расплавленного металла, а так же результаты компьютерного расчета в точках соответствующих расположению термопар в реальной установке.

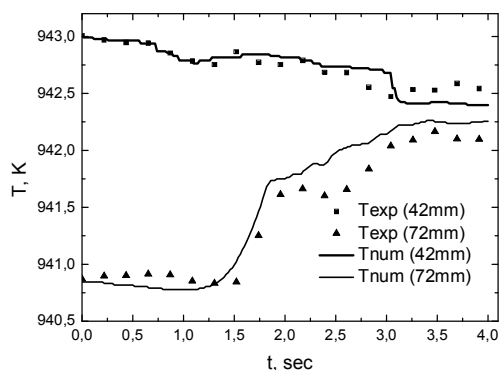


Рис. 5. Сравнение результатов полученных экспериментально и в ходе компьютерного моделирования.

Отклонение экспериментальных результатов от теоретических связано с погрешностью при тарировании термопар и полученных ими данных. Так же это связано с упрощениями, допущенными в компьютерной модели, такими, как отсутствие связи между тепловыми параметрами расплавленного металла и температурой и неточным заданием начальных условий модели. Вместе с тем, четко наблюдается совпадение общего характера экспериментальной и теоретической зависимостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты наглядно демонстрируют достоверность созданной компьютерной модели лабораторного вращателя расплавленного металла, что позволяет ее использовать для дальнейших исследований.

Однако, в будущем стоит уменьшить количество допущений в модели и применять измерительную технику с меньшими погрешностями, чтобы получать еще более точные результаты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лузгин В.И., Петров А.Ю., Фаткуллин С.М., Коптяков А.С., Болотин К.Е., Швыдкий Е.Л. Энергоэффективные индукционные печи для производства синтетического чугуна // Труды XII съезда литейщиков России, 2015. С. 343-349.
2. Бондарь А.И., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. Моделирование физических процессов в печном агрегате с электромагнитным перемешиванием жидкого металла // Технічна електродинаміка, 2016, №4. С. 92–94.
3. Idyatulin A.A., Saparulov S.F., Saparulov F.N., Fatkullin S.M. Simulation of Flank Induction Rotator of Liquid Metal // Russian Electrical Engineering, 2009, №7. pp. 38–43.
4. Васильев А. Ю., Колесниченко И. В., Мамыкин А. Д. и др. Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубе, заполненной натрием // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, № 9. С. 45.